



Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/9987>

To cite this version :

Nicolas BOYARD, Mickaël RIVETTE, Olivier CHRISTMANN, Simon RICHIR - Méthodologie de conception pour la réalisation de pièce en Fabrication Additive - In: 10 Congrès International de Génie Industriel (CIGI), France, 2013-06-12 - Congrès International de Génie Industriel (CIGI) - 2013

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : scienceouverte@ensam.eu



Méthodologie de conception pour la réalisation de pièce en Fabrication Additive

NICOLAS BOYARD¹, MICKAËL RIVETTE¹, OLIVIER CHRISTMANN¹, SIMON RICHIR¹

¹ Arts et Métiers ParisTech, LAMPA

2 Bd du Ronceray, 49000 Angers, France

nicolas.boyard, mickael.rivette, olivier.christmann, simon.richir}@ensam.eu

Résumé : La Fabrication Additive (FA) permet de se libérer d'un grand nombre de contraintes de conception concernant les formes libres, les formes creuses ou encore les assemblages. Ce procédé permet également le recyclage direct de certaines matières plastique, ce qui facilite l'approvisionnement en matière première. Cependant, bien que certaines méthodologies permettent de reconcevoir une pièce pour la réaliser en FA, il n'existe pas encore de véritable méthodologie de conception dédiée à la FA. Dans un premier temps, nous proposerons un travail prospectif sur les bases d'une méthodologie pour un utilisateur final souhaitant concevoir des pièces visant à être réalisée en Fabrication Additive. Nous exposerons ensuite un cas d'utilisation permettant d'illustrer nos propos. Enfin, nous conclurons sur les limites de cette méthodologie et sur les travaux à venir permettant de valider notre méthodologie.

Abstract –Additive Manufacturing (AM) allows designer to sidestep several design requirements and to create free forms, hollow parts or direct assemblies. This process also allows recycling of scrap of plastic into new parts, which eases the raw material supply. However, although several methodologies are used to re-design products and parts, none is dedicated to a real design of parts and products in AM. At first, we will suggest a base of a new design methodology for an end-user who wants to create a product or a part in AM. Then, we will show an example of using our methodology. Finally, we will conclude on the limits of this methodology and on our next work to validate our methodology.

Mots clés - Méthodologie de Conception, Fabrication Additive, Co-Conception.

Keywords - Design Methodology, Additive Manufacturing, Co-Design.

1 INTRODUCTION

La fabrication additive (FA) est un procédé de fabrication très prometteur en termes de possibilités de formes et de complexité de pièces. Il est possible de réaliser des pièces en multimatériaux [P. Muller 2010], des pièces aux formes creuses [B. Vayre 2012], des pièces aux formes libres et complexes [B. Vayre 2012], voire des pièces combinant toutes ces spécificités [N. Boyard 2012].

D'un point de vue écologique, la FA permet également le recyclage de certaines matières. Par exemple, le Fused Deposition Modeling (FDM), qui est un procédé permettant de construire une pièce par dépôt de fil chaud, autorise la réutilisation de certaines matières plastiques comme l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) [KAMERMAKER 2012].

Cependant, pour concevoir un produit, il est nécessaire d'adopter une méthodologie précise et cohérente [Segonds 2011]. Actuellement il existe un grand nombre de méthodologies dont la pertinence varie avec le ou les buts de la conception : assemblage, fabrication par usinage, coût de revient, qualité,... [T. Tomiyama 2009]. Parmi toutes ces méthodologies, on relève un schéma récurrent (figure 1). Cependant, bien que diverses méthodologies de reconception aient été proposées [Rodrigue 2010], [B. Vayre 2012], aucune méthodologie de conception n'a été développée spécifiquement pour la FA.

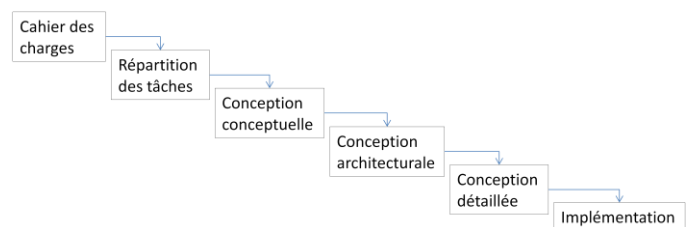


Figure 1. Schéma standard d'une méthodologie de conception [Segonds 2011]

Les travaux de Rodrigue [Rodrigue 2010] révèlent deux méthodologies de conception pouvant se rapporter à la FA : le Design For Assembly (DFA) qui vise à concevoir un produit dans le but de valider et de faciliter son assemblage ainsi que le Design For Manufacturing (DFM) dont le but est de concevoir des pièces réalisables à l'aide d'un ou plusieurs procédé(s) de fabrication particulier(s) [Boothroyd 1994]. Dans le cas de la FA, la géométrie de la pièce n'est presque plus contrainte par le procédé de fabrication. Pour optimiser les pièces du produit vis à vis de l'assemblage et de la fabrication, le DFA et le DFM peuvent donc être effectués directement durant la conception sans générer de contraintes supplémentaires ou de modifications de la demande initiale de l'utilisateur final.

H. Rodrigue propose également une méthodologie de reconception (figure 2).

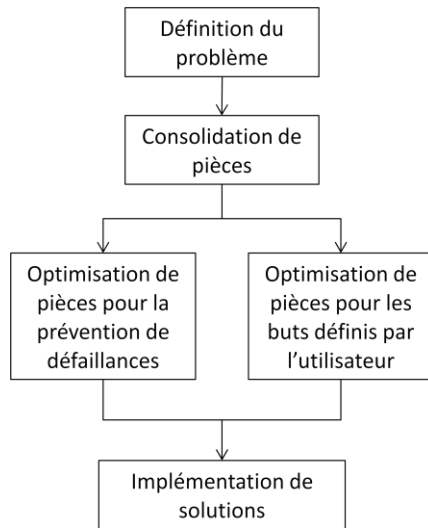


Figure 2. Méthodologie de reconception d'une pièce pour la FA, d'après [Rodrigue 2010]

Cette méthodologie se base sur la maquette numérique du produit existant (Définition du problème) et simplifie cette maquette en fusionnant certaines pièces d'assemblages fixes les unes avec les autres (Consolidation de pièces). Une pièce A fixée à une pièce B par une soudure sont donc fusionnées en une pièce C équivalente respectant toutes les contraintes respectives des pièces A et B.

La maquette résultante est ensuite optimisée selon deux directions différentes : la prévention de défaillances et le respect des contraintes utilisateur. La prévention de

défaillances se base sur une AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité). Elle vise à optimiser le produit pour augmenter sa fiabilité à répondre aux fonctions du cahier des charges. Le respect des contraintes utilisateur vise à améliorer le design de chaque pièce pour répondre au mieux aux contraintes du cahier des charges en limitant au maximum les compromis. Le but est de répondre le plus exactement possible au besoin de l'utilisateur final.

Enfin, les résultats de ces deux optimisations sont confrontés pour décider de la structure et de la forme du produit final.

Le but de cet article est donc d'établir les bases d'une méthodologie de conception capable de prendre en compte les spécificités de la FA. Le but de cet article prospectif est donc d'établir les bases d'une méthodologie de conception capable de prendre en compte les spécificités de la FA. Ces travaux ont été obtenus lors d'une première année de thèse, et font l'objet actuellement de développements permettant d'optimiser cette méthode, de la tester puis de la valider.

2 UNE METHODOLOGIE PLUS COMPLETE

2.1 Présentation générale

Dans les parties suivantes, en nous basant sur l'état de l'art précédent, nous présenterons les fondamentaux nécessaires à l'opérationnalisation de notre méthodologie (figure 3).

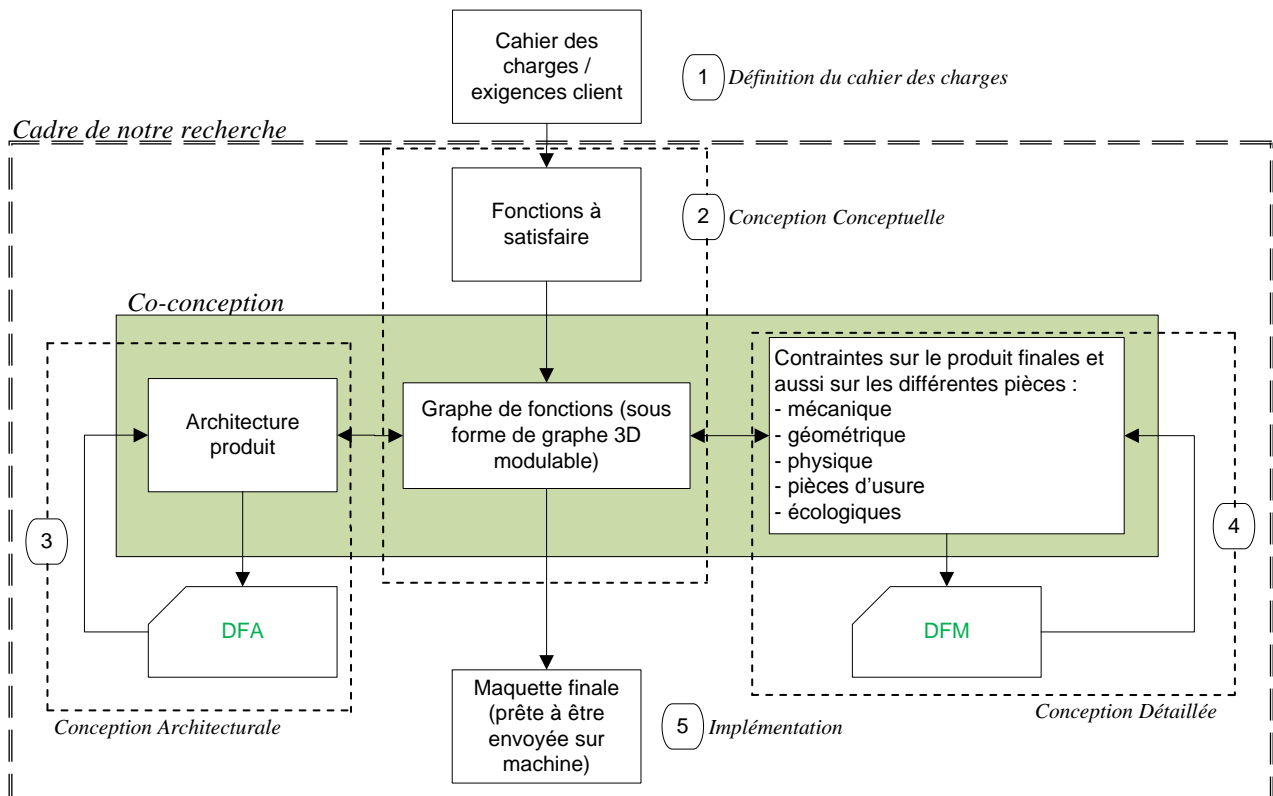


Figure 3. Méthodologie de conception orientée fabrication rapide (DFRM, Design for Rapid Manufacturing)

Notre méthode reprend les 6 étapes d'une méthodologie de conception standard :

- Définition du cahier des charges (1) ;
- Conception conceptuelle (2) ;
- Conception architecturale (3) ;
- Conception détaillée (4) ;
- Implémentation (5).

Les phases 4 et 5, correspondant aux boucles de DFM et de DFA, sont effectuées en parallèle.

Le cadre de notre recherche concerne les points 3 à 6 de cette méthodologie. Nous considérerons donc que les travaux de recueil du besoin et de planification des tâches ont déjà été effectués. De plus, nous ne traiterons pas la phase d'implémentation dans sa totalité. Ces deux étapes, nécessaires à toute méthodologie de conception, ne participent pas à la conception à proprement parler. Nous considérerons également que notre méthodologie est conforme dès le moment où le concepteur est capable de produire un fichier numérique de son produit qui soit fabricable.

Une des difficultés dans la conception d'un produit est de concilier fabrication et assemblage dans le respect bien entendu du Cahier des charges fonctionnels initial. La méthodologie que nous proposons tient à conserver ces deux types de design, mais, plutôt que de les effectuer séparément et à des temps différents, nous cherchons ici à les rendre complémentaires et simultanés.

De plus, du fait de la démocratisation de la FA [Anderson 2012] et de la mise en place de phases de co-conception dans les entreprises (phases où tous les acteurs qui ont un lien avec le produit conçoivent ensemble : ingénieur, fabricant, end-user, designer,...), la méthodologie doit pouvoir être utilisable par n'importe quelle personne sans forcément de pré-requis.

2.2 Conception conceptuelle

La phase de conception conceptuelle (figure 3, étape 3), qui est le véritable point de départ de notre recherche, vise à reprendre chaque fonction et chaque contrainte du cahier des charges. Cette étape est très simple à réaliser si le cahier des charges a été rédigé de manière logique et complète. Cet ensemble de fonctions servira par la suite à concevoir notre produit.

Cependant, il est fréquent que des modifications de la part du client soient à prendre en compte au fur et à mesure de la conception du produit. C'est pourquoi l'extraction des fonctions du cahier des charges doit être souple et modulaire, de manière à permettre l'ajout de nouvelles fonctions et de nouvelles contraintes.

Une fois les fonctions extraites, celles-ci seront triées arbitrairement et disposées dans un graphe de fonctions par les acteurs de la conception dans le but de proposer une première architecture du produit final. De même, le graphe sera capable d'accueillir de nouvelles fonctions au fur et à mesure des modifications de la part du client.

Ce graphe est un graphe modulable en trois dimensions qui sera établi dans un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) (figure 4).

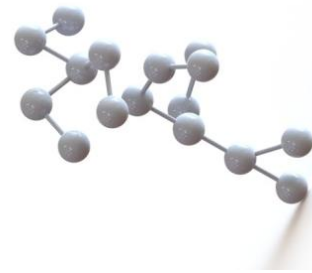


Figure 4. Graphe de Fonctions

Chaque fonction est représentée sous la forme d'une sphère. Les fonctions sont ensuite liées les unes aux autres par des segments étirables. Ces segments représentent à la fois les liaisons directes entre les fonctions et l'organisation spatiale des fonctions les unes par rapport aux autres. Ainsi, différentes fonctions sont reliées entre elles si elles appartiennent à la même pièce. De plus, une fonction A reliée uniquement à une fonction B elle-même uniquement reliée à une fonction C indique que la fonction B se retrouvera entre/séparera les fonctions A et C (figure 5).

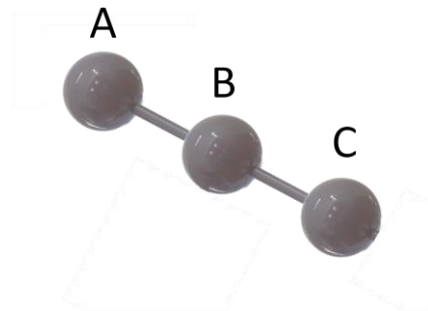


Figure 5. Rôle des segments

Cette représentation permet à l'utilisateur de la méthodologie de réorganiser spatialement les fonctions les unes par rapport aux autres. L'avantage est, sans commencer la réflexion sur les solutions techniques, de pouvoir commencer à donner forme au produit final en se basant uniquement sur les fonctions et les contraintes auxquelles il doit répondre.

De plus, ce graphe étant modifiable, chaque fonction peut être réorganisée par rapport aux autres et chaque liaison peut être modifiée. Ceci permet deux choses : la première est d'offrir un support de discussion modulable aux acteurs de la conception, la seconde est de permettre aux acteurs de pouvoir réviser facilement le résultat de la conception conceptuelle.

En se basant sur le graphe, les acteurs vont définir différents sets de fonctions. Les règles pour établir un set sont :

- La pièce correspondant à ce set est-elle une pièce d'usure;
- Les fonctions peuvent-elles être regroupées sur la même pièce ou doivent-elles être dissociées;
- Les pièces sont-elles mobiles les unes par rapport aux autres;
- ...

Un set de fonctions correspond à un ensemble de fonctions reliées entre elles par des liaisons. Un set peut contenir une unique fonction. Si toutes les fonctions du cahier des charges sont reliées les unes aux autres, alors le graphe ne contiendra qu'un seul set (figure 6).

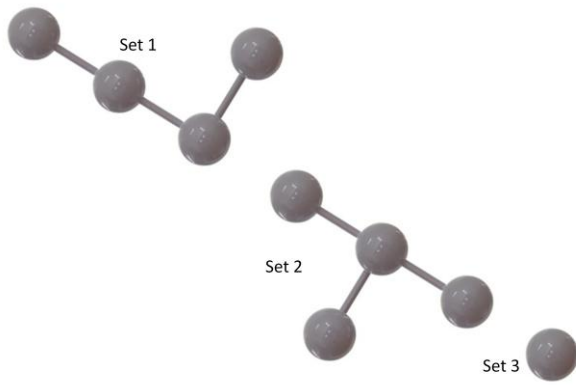


Figure 6. Exemple de graphe comprenant deux sets de quatre fonctions et un set de une fonction

Chaque set de fonction correspond à une pièce du produit. Puisque la FA permet de fabriquer n'importe quel type de pièce mécanique, nous partons sur le principe que pour tout set de fonctions il existe au moins une pièce répondant à toutes les fonctions de ce set.

2.3 Conception détaillée

La conception détaillée correspond à une phase de DFM (figure 3, étape 4). Chaque set de fonctions présent dans le graphe de fonctions est analysé selon la méthode présentée dans la figure 7.

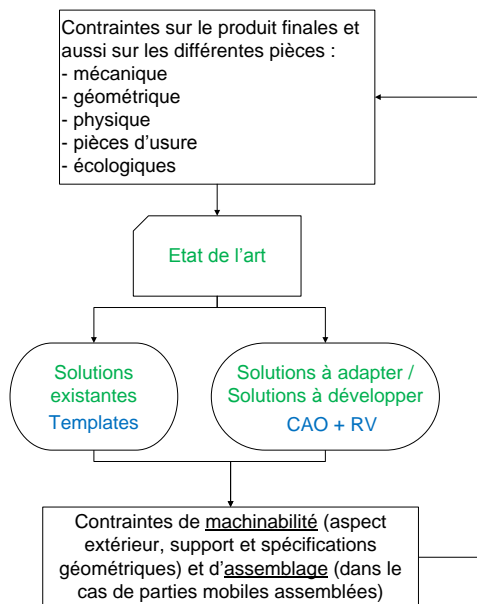


Figure 7. Conception détaillée

Tout d'abord, toutes les contraintes que devra supporter la pièce sont ajoutées au set de fonctions. Ces contraintes peuvent être mécaniques, géométriques, physiques, d'usure, écologiques,...

Les contraintes sont ajoutées en surcouche sur la géométrie proposée par le graphe de fonctions.

Le logiciel de CAO viendra alors comparer le sous-graphe correspondant à la pièce à une base de données comportant différents modèles existants. Cette base de données peut être ouverte ou bien privée. Ceci correspond à l'étape d'état de l'art.

En fonction de la réponse du logiciel, les acteurs pourront obtenir une pièce déjà conçue ou auront l'obligation d'adapter une solution existante ou de concevoir une nouvelle pièce.

Dans ces deux derniers cas, les acteurs devront détailler la géométrie de la pièce et proposer une combinaison d'un ou plusieurs matériaux permettant de satisfaire aux contraintes et aux fonctions imposées.

Enfin, les concepteurs devront renseigner une machine de FA pour la fabrication pièce. La géométrie de la pièce sera confrontée aux capacités de fabrication de la machine de FA et aux contraintes d'assemblages avec les autres pièces.

Si la pièce ne répond pas à ces critères, les acteurs devront alors reconcevoir la pièce, soit en modifiant la géométrie, soit en changeant les matériaux, soit en ajoutant ou en retirant des fonctions.

Si la pièce est valide, dans ce cas elle est verrouillée dans le graphe. Si une fonction est ajoutée ou retirée à une pièce, validée ou non, celle-ci doit de nouveau valider la phase de conception détaillée.

2.4 Conception architecturale

La phase de conception architecturale se réalise en parallèle de la phase de conception détaillée (figure 3, étape 4). Puisque que le graphe est modulaire, il est possible à n'importe quelle instant de modifier la structure du produit. Cette phase correspond à du DFA (figure 8).

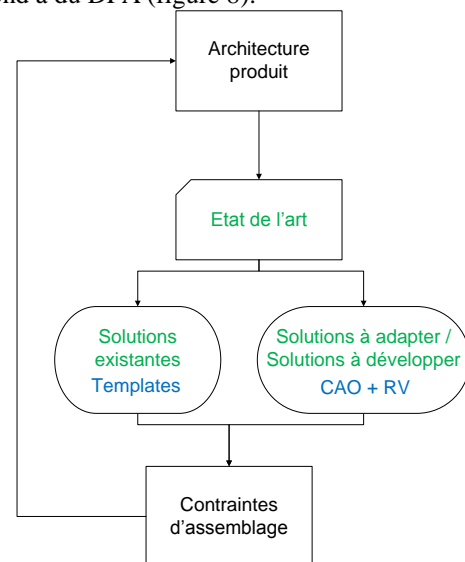


Figure 8. Conception architecturale

A chaque fois qu'un set est créé ou qu'une pièce est validée lors de la conception détaillée, l'architecture du produit doit de nouveau être validée.

Pour cela, le logiciel de CAO vient comparer l'ensemble des sets aux modèles de pièces d'une base de données. A ces pièces sont associés leur set de fonctions ainsi que leur modèle géométrique paramétrable. De cette comparaison, il ressort d'éventuelles solutions existantes pour la structure globale du produit ainsi que pour les solutions d'assemblage entre les différents sets.

Si aucune solution satisfaisante n'est trouvée, le logiciel propose des solutions existantes à adapter en fonction des sets du graphe ou bien indique qu'une nouvelle architecture est à créer par les acteurs.

Une fois que l'architecture du produit a été proposée, celle-ci est confrontée aux contraintes d'assemblage (pièces

démontables ou indémontables, accessibilité des pièces, ordre de montage/démontage,...)
 Si le produit satisfait à ces critères alors il est validé.
 Dans le cas contraire, le logiciel indique que l'architecture du produit est à revoir, ce qui peut amener au passage d'une fonction d'un set à un autre ou à la réorganisation interne de certains sets.

2.5 La co-conception

Un autre but de cette méthodologie est de permettre la co-conception du produit, en faisant intervenir toutes les parties prenantes de la conception (utilisateurs finaux, concepteurs, ...) à chaque instant.

Ainsi, si une partie de la conception détaillée et de la conception architecturale sont délaissées au logiciel de CAO pour la recherche de solution existantes, la majeure partie de la conception se fait suite aux décisions subjectives des acteurs - dont surtout celles du end-user.

C'est pourquoi la phase de co-conception, englobant les conceptions conceptuelle, architecturale et détaillée, doivent permettre d'ajouter des contraintes d'appréciation :

- Physique (textures, répartition et perception du poids du produit) ;
- Mécaniques (souplesse, élasticité) ;
- Géométriques (préhension, esthétiques) ;
- d'Architecture (type de liaison mobile, démontabilité)
- ...

2.6 Livrable

La finalité de notre méthodologie de conception est de pouvoir permettre à l'utilisateur de fabriquer lui-même son produit.
 Une fois que le produit a été validé par l'ensemble des concepteurs et que le logiciel n'impose plus de modification, les pièces qui résultent de la conception vont être post-traitées par le logiciel de CAO de manière à transformer les fichiers numériques des pièces en un code intelligible par la machine.
 Ce post-traitement aura été validé lors de la phase de conception détaillée. En effet, à ce stade, chaque pièce a été confrontée avec les caractéristiques de la machine sur laquelle elle sera fabriquée. Les notions de qualité de surface, de coût matière de fabrication, de machinabilité, de stratégie de fabrication et de précision sont donc validées.
 Une fois la stratégie de fabrication validée par les acteurs, le code est généré et la pièce est prête à être fabriquée.

3 CAS D'ETUDE : LE STYLO A BILLE

Pour illustrer notre méthodologie, nous proposons un cas d'étude simple : celui du stylo encre à bille.

Pour ceci, nous prendrons appui sur un cahier des charges simplifié comprenant les huit fonctions suivantes :

- Pouvoir accrocher le stylo à une poche ;
- Empêcher l'encre de sécher ;
- Protéger la bille des chocs ;
- Recevoir la mine (composant extérieur imposé) ;
- Ne pas glisser des doigts ;
- Être agréable en main ;
- Contenir le réservoir d'encre ;
- Indiquer la couleur de l'encre ;

Les acteurs de la conception vont donc avoir comme première tâche d'établir un graphe des fonctions.

Pour ceci, suite à une discussion entre les acteurs, et notamment avec un ergonome, les trois premières fonctions

vont être regroupées en un premier set et les cinq autres vont faire partie d'un second set (figure 9)



Figure 9. Graphe du stylo à bille

Le logiciel intervient ensuite pour rechercher d'éventuelles solutions existantes répondant aux fonctions des deux sets grâce à sa base de données. Une solution approchant est celle du stylo BIC (figure 10).



Figure 10. Stylo à bille BIC

Cette solution, qui est donc présente dans la base de données du logiciel, propose un produit composé de trois sets (figure 11).

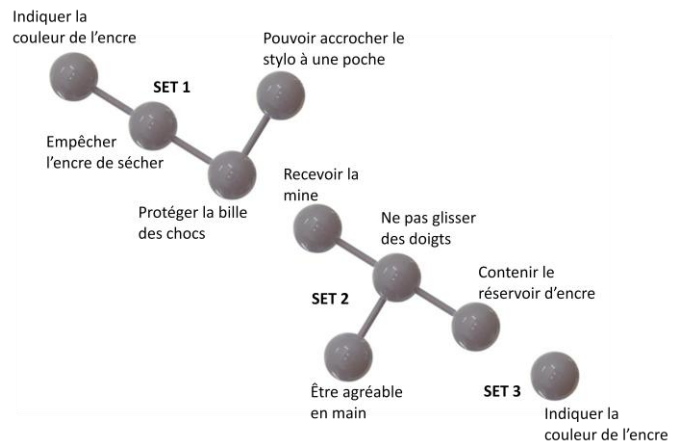


Figure 11. Graphe du stylo à bille BIC

La fonction « Indiquer la couleur de l'encre » est présente sur le premier set et devient également un set à part entière (ceci correspond au bouchon du bout du corps du stylo encre à bille) tandis qu'elle disparaît du second set. Pour répondre parfaitement au graphe de fonctions, il est possible de reprendre le modèle numérique de cette solution mais celle-ci doit être modifiée.

Sur le graphe du stylo BIC, on remarque que la fonction « Indiquer la couleur de l'encre » est présente à deux endroits différents. En effet, si le produit final répond au cahier des charges, il est tout à fait possible de dupliquer une fonction.

De plus, les fonctions sont organisées de manière à représenter la future structure du produit. Ainsi le troisième set (figure 11, set 3) sera a priori en liaison avec le second set (figure 11, set 2) et non avec le premier (figure 11, set 1).

Pour répondre au graphe, il est nécessaire de supprimer la fonction « Indiquer la couleur de l'encre » du set 1 ou bien de modifier le graphe pour inclure cette fonction et être en accord avec la solution proposée par le logiciel. Ce choix est laissé aux acteurs de la conception.

En revanche, pour répondre au graphe, les sets 2 et 3 doivent être fusionnés.

Cette fusion entre les deux sets fait intervenir l'étape de contrainte machinabilité de la boucle de DFM (figure 7, case 5). Selon la machine de FA qui sera utilisée, les acteurs auront comme possibilité de fabriquer le corps du stylo dans un matériau de la couleur de l'encre ou bien de fabriquer la pièce du second set en multimatériaux dont au moins un est de la couleur de l'encre.

Une fois que le graphe a été validé, les acteurs vont pouvoir modifier la disposition des fonctions à l'intérieur des sets pour commencer à créer la géométrie des pièces.

Dans notre cas, puisque le logiciel a proposé des solutions existantes, il est possible de se baser sur les modèles numériques de ces solutions pour concevoir la géométrie des pièces.

Le premier set correspond donc au capuchon du stylo à encre tandis que le second set correspond au corps du stylo.

En ajoutant des contraintes sur les sets, les acteurs vont déterminer petit à petit la géométrie finale et les matériaux des pièces. Ceci indiquera le coût en matière première du produit.

De plus, la conception du stylo devra intégrer la présence du réservoir d'encre.

Les acteurs devant avoir connaissance de la géométrie de toutes les pièces imposées, il disposerons donc, a minima, de plans leur permettant de récréer une maquette de ces pièces extérieures pour pouvoir concevoir la géométrie de leur produit.

Dans notre cas, on pourra donc supposer que le corps du stylo sera en plastique transparent, de manière à ce que l'utilisateur final puisse observer la quantité d'encre restante dans son stylo. Le type de plastique et la géométrie du corps devront assurer les fonctions « être agréable en main » et « ne pas glisser des doigts ». Ces choix sont également laissés aux acteurs de la conception.

Le capuchon pourra également être fabriqué en plastique mais sera impérativement de la couleur de l'encre puisque la fonction « Indiquer la couleur de l'encre » fait partie du premier set. Il n'est donc pas possible d'ajouter une étiquette colorée sur le capuchon (sinon le graphe aurait présenté trois set, comme sur la figure 11).

Au fur et à mesure de la conception le logiciel vérifie le respect des contraintes d'assemblage et de fabrication en indiquant les éventuelles erreurs ou incompatibilité. Ainsi, la maquette résultant de la conception est prête à être convertie en langage interprétable par la ou les machines de FA choisies pour lancer la fabrication du produit.

4 LIMITATIONS

La méthodologie présentée dans cet article faisant l'objet d'une thèse, certains points n'ont pas encore été testés. Ainsi, l'ensemble de la méthodologie reste à valider lors d'une

expérimentation faisant intervenir différents acteurs (ergonomes, ingénieurs, fabricants, designers, utilisateurs finaux, ...).

De plus, il est difficile d'évaluer le coût de certains développements à réaliser sur le logiciel de CAO. Si la faisabilité technique de notre méthodologie a été validée grâce à l'utilisation logiciel SolidWorks qui autorise l'ajout de fonctionnalités comme l'intégration d'une base de données comparative, la durée et la complexité de ces développements n'a pas encore été quantifiée.

Ainsi, la méthodologie proposée dans cet article se situe encore à un niveau d'idéal et non de réalité. Elle permet cependant de faire un état précis des besoins et des développements nécessaires. Ce sont autant de pistes d'études à explorer.

Un autre point à développer est la manière dont les acteurs vont interagir avec le graphe de fonction. Il existe différentes technologies permettant l'interaction multiutilisateurs entre des personnes et un logiciel [Kadri 2007] cependant la difficulté est de proposer une solution adaptée à tous les acteurs, que ce soit pour leur vision de la conception, pour leur vocabulaire ou encore pour leur domaine de compétence [Segonds 2011].

5 CONCLUSION

La méthodologie que nous proposons permettra donc de concevoir des pièces réalisées en FA en répondant de la manière la plus précise au cahier des charges.

De plus, cette méthodologie permet de concevoir des pièces aux géométries complexes en s'abstrayant d'un grand nombre de contraintes de fabrication liées aux procédés conventionnels (dépouilles, accès de l'outil de coupe, lubrification, usure de l'outil, ...).

Cette méthodologie permet de concevoir des pièces satisfaisant à la fois le DFA et le DFM dès le début de la conception. Ceci limitera donc, a priori, les coûteuses modifications tardives.

Enfin, cette méthodologie s'inscrit dans une dynamique environnementale en proposant, pour certains procédés, la possibilité de réaliser des pièces en consommant uniquement la quantité de matière nécessaire au volume final [N. Boyard 2012].

6 REFERENCES

- Anderson, C. (2012) L'imprimante 3D aura plus d'impact que le WEB.
- B. Vayre, F. V., F. Villeneuve (2012). "Designing for Additive Manufacturing."
- B. Vayre, F. V., F. Villeneuve (2012). Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. AIP PRIMECA, Le Mont Dore.
- Boothroyd, G. (1994). "Product design for manufacture and assembly." *Computer-Aided Design* 26(7): 505-520.
- Kadri, A. (2007). Contribution de la réalité virtuelle à l'évaluation de produits, dans les phases amonts du processus de conception. Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication. Université d'Angers, ÉCOLE DOCTORALE D'ANGERS. PhD.

KAMERMAKER (2012). KAMERMAKER IN 5 QUESTIONS.

N. Boyard, M. R., O. Christmann, S. Richir (2012). Méthodologie de prise en compte de la Fabrication Additive lors de la phase de conception. AIP PRIMECA, Mont Dore.

P. Muller, P. M., J.Y. Hascoet (2010). "Modeling and control of a direct laser powder deposition process for Functionally Graded Materials (FGM) parts manufacturing." Journal of Materials Processing Technology.

Rodrigue, H. (2010). Méthodologie de conception et d'optimisation de mécanismes fabriqués par fabrication rapide.

Segonds, F. (2011). Contribution à l'intégration d'un environnement collaboratif en conception amont de produit. LCPI&LSIS, ENSAM. PhD: 243.

T. Tomiyama, P. G., Y. Jin, D. Lutters, Ch. Kind, F. Kimura (2009). "Design Methodologies : Industrial and educational applications." CIRP Annals - Manufacturing Technology.